

ジョイスティック操作に対する フレキシブルロボットアームの振動制御

増井詠一郎 佐藤拓史 (長岡工業高等専門学校)

Active Vibration Control of Flexible Robot Arm for Manual Operation

*Y. Masui, H. Satoh (Nagaoka National College of Tech.)

Abstract— This paper deals with active vibration control of flexible robot arm for manual operation. Robot arm has been used in many fields of industry. Upon request, such as lightweight and high-speed operation of the robot arm, the robot arm will have the flexibility. Therefore, many researches about flexible robot arm have been reported. However, the input signals are used in these studies, a known input signal is a step or impulse. In this research, we construct the vibration control system of flexible robot arm for a random signal. Linear quadratic regulator method is used to design the controller to achieve reduced vibration. The experimental results show the effectiveness of the designed control system for a random signal.

Key Words: Active Vibration Control, Flexible Robot Arm, Manual Operation, Linear Quadratic Regulator

1 緒言

近年, 多様化する産業の中で多くのロボットアームが用いられている。ロボットアームには, 作業を効率化するための高速動作や, 製造コストを削減するための軽量化など様々な要求がある。時として, このような要求を満たした場合にロボットアームは剛性を失い, 動作時に振動を励起してしまう。励起された振動は, ロボットアーム手先の位置決め精度を低下させ, 作業効率を悪化させるだけでなく, 安全性も低下させる。よって, 柔軟化されたロボットアームを駆動する際には振動制御が必要となり, これを実現するための研究が多数行われている。一般的なフレキシブルロボットアームの振動制御はインパルス入力やステップ入力を印加し, その制振性能を検証している^{1, 2, 3)}。また, ロボットアームの振動をフィードバックするのではなく, アームの振動を発生させない軌道生成を行う研究も報告されている^{4, 5)}。しかし, これらの研究ではロボットアームへの入力が既知であるという条件がある。

これに対し, 人がロボットアームを操作する用途が増えてきている。記憶に新しい例では, 2010 年 4 月に国際宇宙ステーションで宇宙飛行士の山崎直子さんがロボットアームを操作し, 補給を行ったことが挙げられる⁶⁾。このロボットアームは全長 10[m] 以上と非常に長尺なものであり, フレキシブル性を有するロボットアームである。補給用モジュールの取り出しから取り付けには数時間かけて行うなど, その操作には高度な技術が必要となる。柔軟なロボットアームに対し人が直接操作する場合には, 操作入力の不規則になりやすく, 振動を発生させる要因になる。このような不規則の入力に対しても振動を抑制した制御系を構成することが望まれる。

そこで, 本研究では 1 リンク回転型フレキシブルロボットアームを構成し, アーム先端の振動を抑える制御系を設計する。コントローラ的设计には最適レギュレータ法を用いて, 各振動モードを低減させる制御系を構成する。制御実験により, どの振動モードまでを考慮した場合が効果的であるかを見極め, ジョイスティック操作による制御実験を行う。ジョイスティック操作を

行っても手先振動を抑えた制御系が構成できていることを確認し, 設計したコントローラの有効性を示す。

2 制御対象の構成とモデリング

2.1 制御対象の構成

本研究で使用する 1 リンク回転型フレキシブルロボットアームの外観を Fig. 1 に示す。

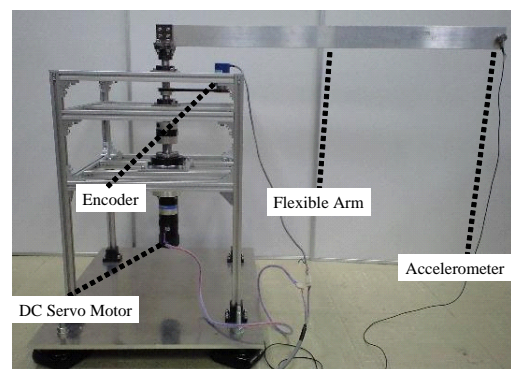


Fig. 1: Overview of experimental system

制御対象となるロボットのアーム部分は, アルミ材 (750 × 50 × 3[mm]) を使用する。アームの駆動は DC サーボモータ (SANYO T511T-012 110W) にハーモニックドライブを介して行い, 速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動する。アーム先端の加速度は加速度ピックアップ (RION PV-85) により測定し, アームの回転角度はハーモニックドライブの出力軸にタイミングプーリを介してロータリーエンコーダ (多摩川精機 TS5312N510 2000C/T) により測定する。

また, コントローラの実装には dSPACE 社の DS1104 を用いる。エンコーダから出力されるアームの回転角は DS1104 のカウンタポートに, 加速度ピックアップからの加速度情報は汎用振動計 (RION VM-83) を介して A/D ポートへ接続されている。コントローラは A/D ポート, カウンタポートより入力された情報に基づき制御量を算出する。算出された制御量は D/A ポートを介して出力され, サーボアンプに入力される構成となっている。コントローラ的设计には MATLAB, Simulink を用いる。

2.2 準備

Fig. 1 に示す制御対象は、モータ系、フレキシブルアームから構成されており、振動加速度は汎用振動計を介して出力され、アームの回転角はエンコーダにより出力される。したがって、制御対象は Fig. 2 に示す構成として考えることができる。

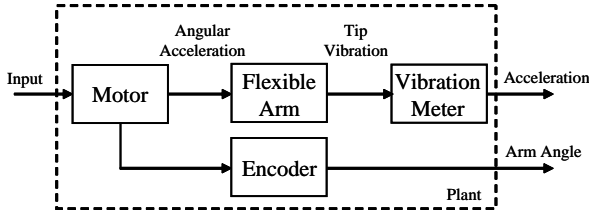


Fig. 2: Composition of plant

制御対象の数学モデルは、個々のモータ系、フレキシブルアーム、汎用振動計のモデリングを行い、最終的にそれらをまとめることで求めることにする。個々の構成部分についてモデリングすることで、後述するパラメータ同定を行いやすくするためでもある。

2.3 モータ系のモデリングとパラメータ同定

フレキシブルロボットアームの駆動には DC サーボモータを用い、モータの駆動には内部に速度制御系が構成されたサーボンプを用いる。速度制御系が構成されたモータ系は回転角 θ に対して次式として与えられることが知られている⁷⁾。

$$\ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_2 \theta = \beta u \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ はモータ系の内部パラメータであり、 u はサーボンプに加える入力電圧である。

内部パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ の同定法にはさまざまな方法があるが、ここでは周波数応答法⁸⁾を用いて同定した。同定した結果、内部パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ は以下のように求まった。

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.0631 \times 10^4 \\ \alpha_2 = 8.6002 \times 10^4 \\ \beta = 5.1905 \times 10^4 \end{cases} \quad (2)$$

このパラメータを用いた際の周波数特性を Fig. 3 に示す。Fig. 3 においてマーカー点が周波数応答法で求めた測定結果であり、実線が式 (2) のパラメータを用いた際の周波数特性である。

式 (1) を状態方程式に書き換えると、

$$\begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + B_m v \\ y = C_m x_m \end{cases} \quad (3)$$

となる。ここで、

$$x_m = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T, \quad A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$B_m = [0 \quad 0 \quad \beta]^T, \quad C_m = \begin{bmatrix} C_{m1} \\ C_{m2} \end{bmatrix},$$

$$C_{m1} = [0 \quad 0 \quad 1], \quad C_{m2} = [1 \quad 0 \quad 0]$$

である。

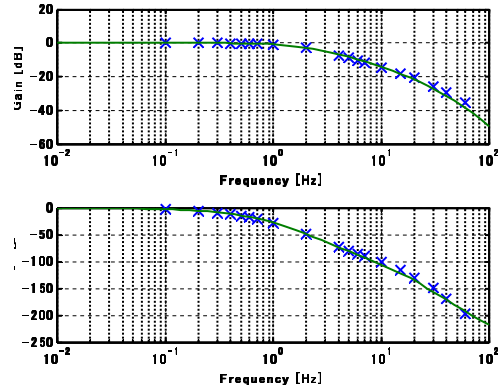


Fig. 3: Frequency response of motor system

2.4 アーム部のモデリングとパラメータ同定

フレキシブルアームは連続体であり、無限次元の振動モードを有する。これをそのまま数学モデルとして表現することはできない。まず、有限次元のシステムとして考える必要がある。ここでは、制御対象の伝達特性を FFT 解析を行うことで求め、モデリングの指針を決定する。Fig. 4 に 1000[Hz] までの FFT 解析結果を示す。

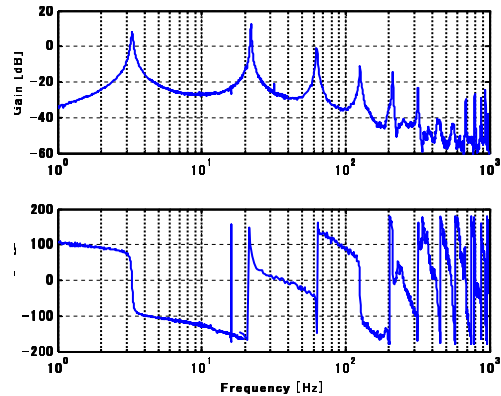


Fig. 4: Result of FFT analysis to 1000[Hz]

Fig. 4 より、4 次以降の振動モードは 100[Hz] 以上と周波数が高く、Fig. 3 のアクチュエータ特性を考慮すると制御性能が期待できない。そこで、本研究では 3 次振動モードまでを考慮することとする。ここでは Fig. 5 に示す 3 質点の集中定数系モデルとしてモデリングを行う⁹⁾。

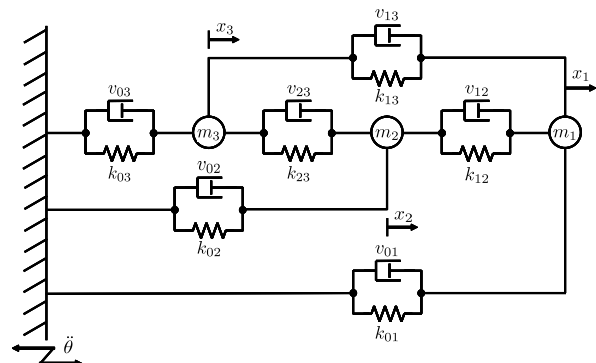


Fig. 5: Flexible arm model

各質点の変動量を x_j とし、 m_j は各質点の質量、 k_{ij}

は質点間のばね定数, v_{ij} は質点間の減衰係数である。また, 各質点の加速度影響定数を η_j として, 固定端に角加速度 $\ddot{\theta}$ の制御入力がかかると, Fig. 5 の運動方程式は以下のように表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [V]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[F]\ddot{\theta} \quad (4)$$

ここで, $[M]$, $[V]$, $[K]$ はそれぞれ質量行列, 減衰行列, 剛性行列であり, $[F]$ は制御力が働く場所を示す行列である。 $\{x\}$ はそれぞれの質点の位置を示す列ベクトルである。

パラメータ同定した結果を Fig. 6 に示す。3 次振動モードまでよく一致していることが確認できる。同定によって得られた物理パラメータを Table 1 に示す。

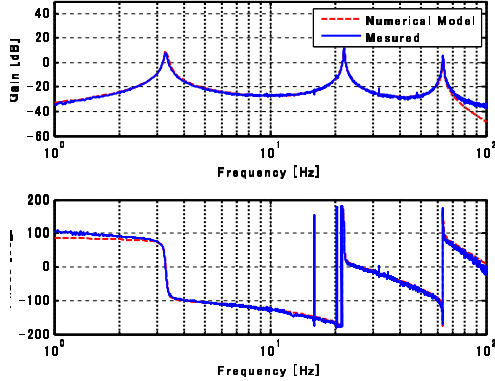


Fig. 6: Identification result of flexible arm

Table 1: Physical parameters of flexible arm

Mass [kg]	Influence coefficient
$m_1 = 0.132$	$\eta_1 = 0.0052$
$m_2 = 0.100$	$\eta_2 = 0.0001$
$m_3 = 0.100$	$\eta_3 = 0.0210$
Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$k_{01} = -295.7$	$v_{01} = 0.0404$
$k_{02} = -940$	$v_{02} = 0.0828$
$k_{03} = 12700$	$v_{03} = 0.3096$
$k_{12} = 600$	$v_{12} = 0.0126$
$k_{13} = -50$	$v_{13} = 0.0010$
$k_{23} = 2600$	$v_{23} = 0.0546$

式 (4) の状態方程式は

$$\begin{cases} \dot{x}_a = A_a x_a + B_a \ddot{\theta} \\ y_a = C_a x_a \end{cases} \quad (5)$$

と表せる。ここで,

$$x_a = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3]^T,$$

$$A_a = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} K_1 & \frac{k_{12}}{m_1} & \frac{k_{13}}{m_1} \\ \frac{k_{12}}{m_2} & K_2 & \frac{k_{23}}{m_2} \\ \frac{k_{13}}{m_3} & \frac{k_{23}}{m_3} & K_3 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} V_1 & \frac{v_{12}}{m_1} & \frac{v_{13}}{m_1} \\ \frac{v_{12}}{m_2} & V_2 & \frac{v_{23}}{m_2} \\ \frac{v_{13}}{m_3} & \frac{v_{23}}{m_3} & V_3 \end{bmatrix},$$

$$K_1 = -\frac{k_{01} + k_{12} + k_{13}}{m_1}, \quad K_2 = -\frac{k_{02} + k_{12} + k_{23}}{m_2},$$

$$K_3 = -\frac{k_{03} + k_{13} + k_{23}}{m_3},$$

$$V_1 = -\frac{v_{01} + v_{12} + v_{13}}{m_1}, \quad V_2 = -\frac{v_{02} + v_{12} + v_{23}}{m_2},$$

$$V_3 = -\frac{v_{03} + v_{13} + v_{23}}{m_3},$$

$$B_a = [0 \ 0 \ 0 \ \eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3]^T,$$

$$C_a = [a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \ a_{45} \ a_{46}]$$

である。

2.5 汎用振動計のモデリング

今回アーム先端の加速度の測定に用いる汎用振動計には 100[Hz] の 3 次ローパスフィルタが内蔵されている。このローパスフィルタの特性をセンサ特性として考慮する。このローパスフィルタの状態方程式を以下のように表現する。

$$\begin{cases} \dot{x}_l = A_l x_l + B_l \ddot{y}_a \\ y_l = C_l x_l \end{cases} \quad (6)$$

ここで変数の詳細は

$$A_l = \begin{bmatrix} -\omega_c & 0 & 0 \\ \omega_c & -\omega_c & -\omega_c \\ 0 & \omega_c & 0 \end{bmatrix}, B_l = [\omega_c \ 0 \ 0]^T,$$

$$C_l = [0 \ 0 \ 1], \omega_c = 2\pi \times 100[\text{rad/sec}]$$

である。

2.6 制御対象の状態方程式

前節までで, モータ系, フレキシブルアーム, 汎用振動計の数式モデルを求めることができた。制御対象は Fig. 2 のように直列接続の構造となっているので, 式 (3), (5), (6) を用いて状態方程式を導出すると,

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

となる。ここで,

$$x = [x_l \ x_a \ x_m]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} A_l & B_l C_a & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & A_a & B_a C_{m1} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 6} & A_m \end{bmatrix},$$

$$B = [O_{3 \times 1}^T \ O_{6 \times 1}^T \ B_m^T]^T,$$

$$C = \begin{bmatrix} C_l & O_{1 \times 6} & O_{1 \times 3} \\ O_{1 \times 3} & O_{1 \times 6} & C_{m2} \end{bmatrix}$$

である。

3 コントローラ設計

3.1 設計指針

本研究では, コントローラの設計に現代制御理論の 1 つである状態フィードバック制御を用いる。フィードバックゲインの設計には最適レギュレータ法を用いる。本制御対象はフレキシブルアーム先端の加速度とアーム根元の回転角度の状態量しか得ることができないため, 同一次元オブザーバを構成することで状態量の推定を行う。オブザーバ極の設計には極配置法を用いて, オブザーバ極はレギュレータ極の実部を 2 倍安定側へ移動させることで設計する。

3.2 設計仕様の設定

制御仕様を設定するために、アームの回転角度のみの制御を行う。回転角度の目標値 $0.3[\text{rad}]$ に対して、 $2[\text{sec}]$ で整定するように比例ゲインを $K = 4$ とした。その結果を Fig. 7 に示す。グラフは上からアームの回転角度、アーム先端の加速度、目標値からアーム先端加速度までの伝達特性である。ステップ入力はグラフの $1[\text{sec}]$ 時に印加している。

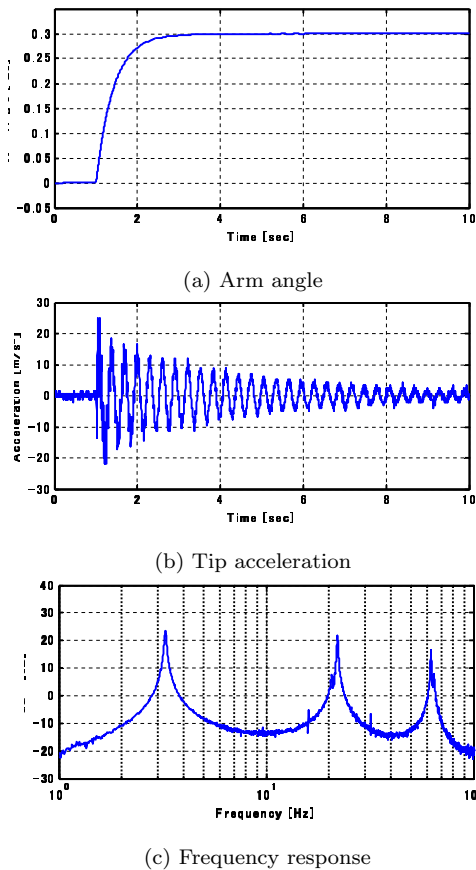


Fig. 7: Experimental results for angle control

Fig. 7 より制御仕様を以下のように設定した。

1. $0.3[\text{rad}]$ のステップ状の目標値に定常偏差なく追従させる
2. ステップ目標値入力に対して速応性を考慮に入れて、アームの回転角は $2[\text{sec}]$ で整定させる
3. 制御開始から $9[\text{sec}]$ の時点で振動波形の面積が、角度制御のみに対して $30[\%]$ 以内にする

3.3 コントローラ設計

振動問題では、状態量の速度項に重みを置くことでダンピング効果が得られることが知られている。コントローラ設計で用いる状態空間モデルはモード分解を行い、状態量をモード座標系へ変換した¹⁰⁾。こうすることで、各モードへ個別にダンピング効果を与えることが可能となる。今回は、どの振動モードを低減することが効果的であるかを検証するために以下の3種類のコントローラを設計した。

コントローラ 1

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 100000, 0, 0, 2000, 89, 73)$$

$$R = 30$$

コントローラ 2

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 100000, 30000, 0, 2000, 89, 73)$$

$$R = 30$$

コントローラ 3

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 100000, 30000, 25000, 2000, 89, 73)$$

$$R = 30$$

ここで、コントローラ 1 は 1 次振動モードのみ、コントローラ 2 は 1 次と 2 次振動モードのみ、コントローラ 3 は 1 次から 3 次振動モードまでに重み係数を与え、重みを設定した振動モードを低減させる。

4 制御実験

4.1 振動モード低減に関する制御実験

3.3 節で設計したコントローラの比較検討を行うために、Fig. 8 のように制御系を構成し、ステップ応答実験を行う。目標値は角度制御のみに同様に $0.3[\text{rad}]$ とする。

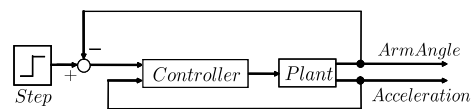


Fig. 8: Composition of controlled system for step

設計したコントローラを用いた場合の制御実験結果を Fig. 9~11 に示す。Fig. 9 はコントローラ 1、Fig. 10 はコントローラ 2、Fig. 11 はコントローラ 3 の実験結果である。グラフはそれぞれ上からアームの回転角度、アーム先端の加速度、目標値からアーム先端加速度までの伝達特性である。

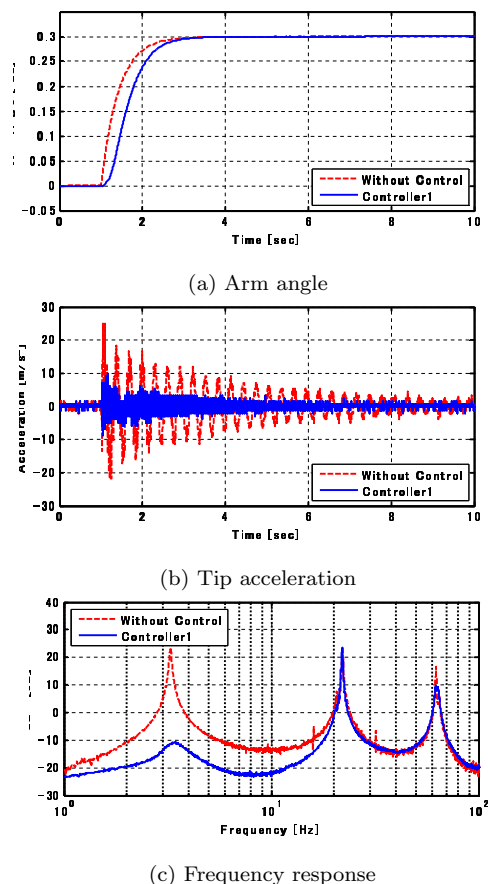
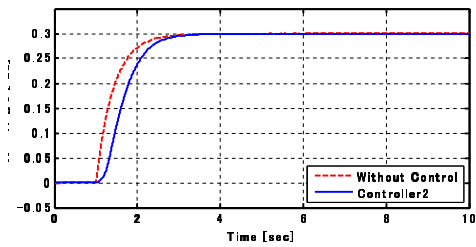
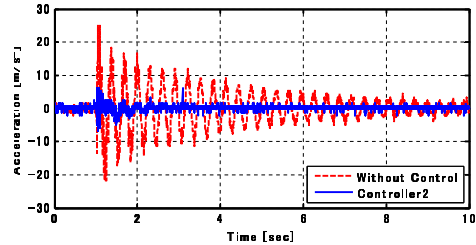


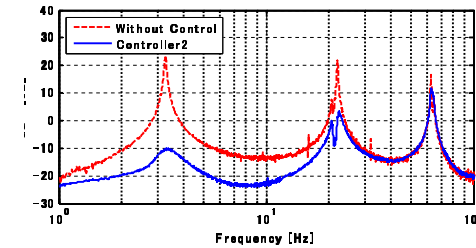
Fig. 9: Experimental results for controller1



(a) Arm angle

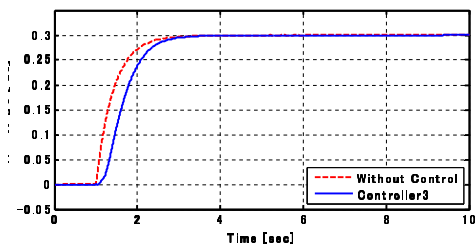


(b) Tip acceleration

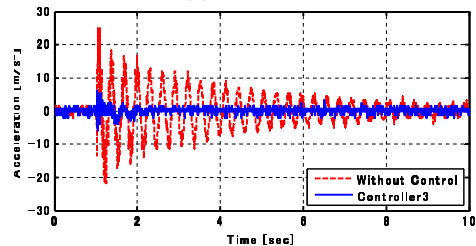


(c) Frequency response

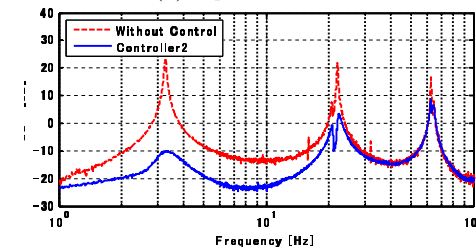
Fig. 10: Experimental results for controller2



(a) Arm angle



(b) Tip acceleration



(c) Frequency response

Fig. 11: Experimental results for controller3

Fig. 9, 10, 11(a) より, 全てのコントローラにおいてアームの回転角度は $0.3[\text{rad}]$ のステップ入力に対し, 約 $2[\text{sec}]$ で整定していることが確認でき, 設計仕様の 1, 2 を満たしている. また, Fig. 9, 10, 11(b) より, 角度制御のみと比較して, 設計したコントローラ全てが振動を抑制できた. さらに, Fig. 9, 10, 11(c) より, それぞれのコントローラで重みを設計した振動モードのゲインを低減できていることが確認できる. また, 低減量から設計仕様 3 を満たしているといえる.

また, Fig. 9, 10, 11(b) のアーム先端における振動応答波形面積を 1 ノルムとして算出し, 角度制御のみとの比率を求めた. その結果を Table 2 に示す.

Table 2: Area ratios of response

Controller	Angle control	Vibration control	Area ratio
Controller1	499.7366	149.1098	0.2984
Controller2	499.7366	72.2999	0.1447
Controller3	499.7366	71.1508	0.1424

Table 2 より, 全てのコントローラにおいて振動が $30[\%]$ 以内に収まっており, 設計仕様 3 を満たした.

Fig. 9, 10, 11(b) と Table 2 より, 制振性能に差が表れなかった. これは, フレキシブルアームの 3 次振動モードの成分が小さいため, 応答波形に大きな影響を与えなかったと考えられる. よって, 本実験装置では 2 次振動モードまで考慮することで, 十分な手先位置決め精度が得られることがわかった.

4.2 ジョイスティック入力による制御実験

前節より, 本実験装置に対しては 2 次振動モードまでを考慮したコントローラ 2 を用いることで十分なアーム先端の制振効果が得られることがわかった. そこで, コントローラ 2 を用いて, ジョイスティック入力を用いた場合の振動制御実験を行う.

一般にジョイスティックでの操作は位置指令値よりも速度指令値で与えるほうが直感的に操作しやすい. しかし, 前節の実験においては制御系への入力は位置指令値としていた. そこで, 速度指令値を位置指令値に変換するために, Fig. 12 のように制御系の構成を変更した.

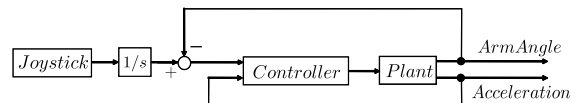
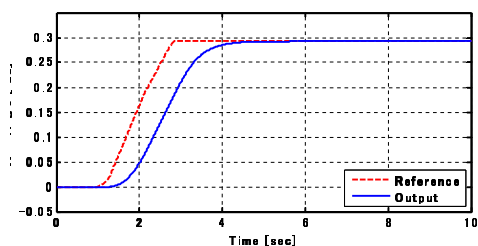


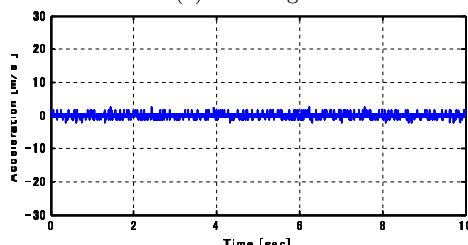
Fig. 12: Composition of controlled system for joystick

実験はロボットアームの操作を約 $2[\text{sec}]$ で $0.3[\text{rad}]$ の回転運動を行うように行った. その結果を Fig. 13 に示す. グラフは上からアームの回転角度, アーム先端の加速度である. Fig. 13(a) において, 破線がジョイスティックの速度指令値を位置指令値に変換した目標値であり, 実線がアームの回転角度である. アームの操作はグラフの $1[\text{sec}]$ 時より行っている.

Fig. 13(b) より, アーム先端にはほとんど振動を励起せずに駆動できている. 一方で, Fig. 13(a) より, モータの角度応答は入力から約 $1[\text{sec}]$ ほど遅れて駆動している. これではジョイスティックを用いて直感的な操作ができるとはいえない. ジョイスティックからは速度指



(a) Arm angle



(b) Tip acceleration

Fig. 13: Experimental results with joystick for controller2

令値として与えられるが、これを位置指令値へ変換しているため、目標値がステップ状とはならずランプ状に変化することになる。ランプ状目標位置に対する追従性を向上させることを考える。

そこで、コントローラ2のモード速度項に対する重みは変更せず、目標位置入力に対する追従性を改善するために次のコントローラ4を設計した。

コントローラ4

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 100000, 30000, 0, 15000, 0, 40)$$

$$R = 30$$

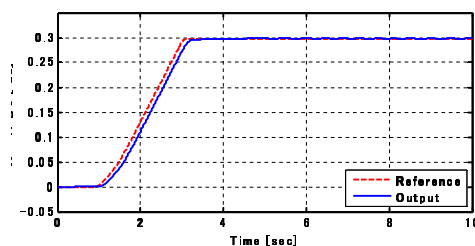
Fig. 14にコントローラ4を用いたときの実験結果を示す。グラフは同様に上からアームの回転角度、アーム先端の加速度である。Fig. 13(a)において、破線がジョイスティックの速度指令値を位置指令値に変換した目標値であり、実線がアームの回転角度である。アームの操作はグラフの1[sec]時より行っている。

Fig. 14(a)より、目標値に対してほぼ遅れなく追従しており、追従性の改善ができた。このため、ロボットアームの操作性は直感的に行うことが可能となった。また、Fig. 14(b)においても、ほとんど振動を励起することなく駆動できている。よって、ジョイスティックを用いて直感的な操作が行え、アーム先端の振動を抑制する制御系を構成できたといえる。

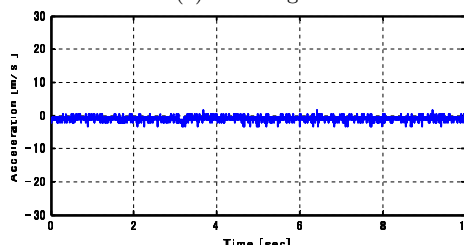
5 結言

フレキシブルロボットアームの手先振動を抑え駆動させる制御系を構成するために、1リンク回転型フレキシブルロボットアームを構成した。構成した制御対象に対し、ステップ目標値を印加した場合に振動を抑えるコントローラを最適レギュレータ法を用いて設計し、制御実験でその有効性を確認した。制御実験より、2次振動モードまでを考慮したコントローラで十分な制御性能を得ることができた。

ジョイスティック操作によるロボットアームの駆動では、目標値への追従性能が悪く直感的な操作性が得ら



(a) Arm angle



(b) Tip acceleration

Fig. 14: Experimental result with joystick for controller4

れなかった。追従性を改善するコントローラを新たに設計することにより追従性を改善することができた。

今後はよりランダムな入力をジョイスティックで与えた場合でも、アームの手先振動を抑えた制御系を構成することを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 坂和愛幸, 松野文俊, フレキシブルアームのモデリングと制御, 計測と制御, Vol.25, No.1, 64/70, (1986)
- 2) 山本真剣, 土館浩平, 渡辺亨, 背戸一登, 田島洋, フレキシブルロボットアームのモデリングと制御, Dynamics and Design Conference 2002 CD-ROM 論文集, (2002)
- 3) 中西洋介, 浦池隆文, 鈴木耕裕, 柔軟作業アームの制御, 北海道立工業試験場報告, No.305, (2006)
- 4) 小島宏行, 関節角目標値計画によるフレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 65巻, 635号, 2659/2664, (1999)
- 5) 阿部晶, 駆動トルクに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画, 日本機械学会論文集 (C編), 74巻, 745号, 154/161, (2008)
- 6) <http://www.jaxa.jp/>
- 7) 森政弘, 小川鎌一, 初めて学ぶ基礎制御工学, 東京電機大学出版局, (2008)
- 8) 足立修一, MATLABによる制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局, (1996)
- 9) 背戸一登, 構造物の振動制御, コロナ社, (2008)
- 10) 永井正夫, 景山一郎, 田川泰敬, 振動工学通論, 産業図書株式会社, (1995)